

加圧過熱液体噴流の微粒化特性に関する研究

著者	佐藤 一教
号	940
発行年	1983
URL	http://hdl.handle.net/10097/9676

氏 名	佐 藤 一 教
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 59 年 3 月 27 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程)精密工学専攻
学 位 論 文 題 目	加圧過熱液体噴流の微粒化特性に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 永井 伸樹
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 永井 伸樹 東北大学教授 戸部 俊美 東北大学教授 武山 斌郎 東北大学教授 大谷 茂盛 東北大学教授 箱守京次郎

論 文 内 容 要 旨

加熱した加圧液体をその液温に相当する飽和蒸気圧以下の低圧まで急減圧すると，過熱状態となった液体は，瞬時に沸騰を開始し急激に変形して分裂する。このように空間に噴出した二相噴流が分裂する現象は，ボイラ配管の破損時やタンクのドレン等でみられるフラッシング現象として知られていたが，熱エネルギーを利用する液体微粒化法としても注目され，これまでもいくつかの研究がなされている。

その中で，単孔ノズルからの加圧過熱液体噴流に関して気泡の成長過程や分裂条件等の基本的機構が次第に解明されつつあるものの，多くは実験条件を限定しており，微粒化特性については断片的に示されているにすぎないなど，現状では液体微粒化の立場からみて一貫した研究が見あたらない。

しかるに沸騰微粒化現象を液体微粒化へ積極利用するためには，液体の分裂過程にとどまらず，さらに噴射弁設計に資する基本的な微粒化特性の表示や，操作条件の確立および実用へ向けた現象利用へと研究を進展させる必要がある。

以上の観点から，本論文は，単孔ノズルの寸法や形状，材質及び液体温度や噴射圧力などの噴射条件を広範に変えた微粒化実験を行い，加圧過熱液体噴流の沸騰微粒化現象と微粒化特性を総合的

にまとめたものである。

以下各章ごとに内容の主要部分を概説する。

第 1 章 序 論

加圧過熱液体噴流に関する研究の重要性を論じた。次いで関連する既往の研究成果を概観してその問題点を指摘し、本研究の方向性を明確にした。

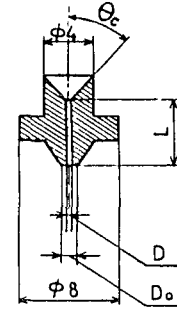
第 2 章 加圧過熱液体噴流の微粒化現象

単孔ノズルの寸法、形状、材質及び噴射圧力、液体温度を変えた実験を行い、観察された現象全般にわたり詳細な検討を加えた。

図 1 に本実験で使用した単孔ノズルの形状を示す。

ノズル長さや噴射圧力の相違によって、液体がノズル円筒部内壁に接触するかどうかという流動状態の変化が生じ、液柱分裂形もしくは気液二相噴出形の噴霧生成が行われることを見出した。水を用い、黄銅製ノズルの長さを変えてみられる両微粒化形態を図 2，3 に示す。

複雑な液体の分裂現象が、(1)液体内部から、(2)ノズル内壁面から、(3)液体噴流表面からという 3 つの気泡生成要因の組み合わせで特徴づけられ、ノ



BRASS NOZZLE

図 1 ノズルの形状

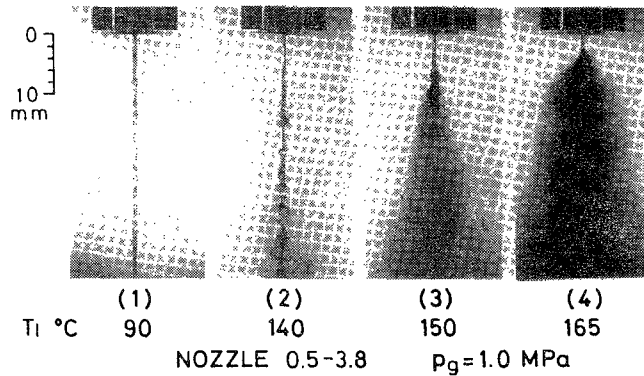


図 2 液柱分裂形微粒化

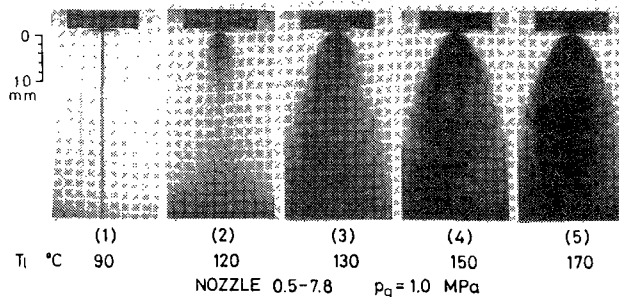


図 3 気液二相噴出形微粒化

ズル寸法や噴射条件に対応して変化することを明らかにした。図 4 は、液体の過熱度と噴射圧力の関連を示す無次元過熱度 T_L^* と、ノズル内の流動状態をあらわす $Re(D/L)$ を用いて、上記 3 つの気泡生成要因をもとに微粒化現象を無次元表示で整理したものである。行った微粒化実験全般にわたり一括していえることは、 $Re(D/L) \div 10^4$ を境に液柱分裂形もしくは気液二相噴出形の微粒化がみられること、及び一般に液温が上昇するかもしくは噴射圧力が下がって $T_L^* > 0.55$ の領域になると、主要な気泡生成箇所が液体内部に移り、激しい沸騰分裂によって良好な噴霧が得られるようになる、という 2 点である。

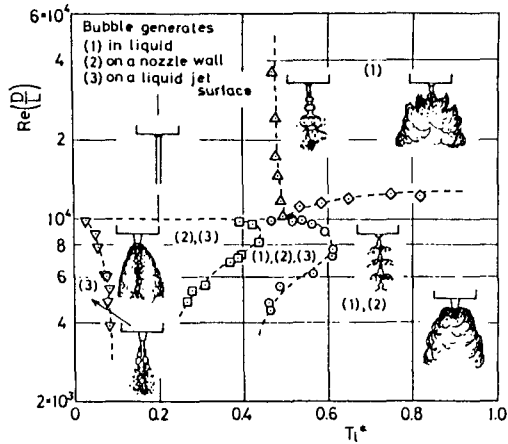


図4 微粒化現象の分類

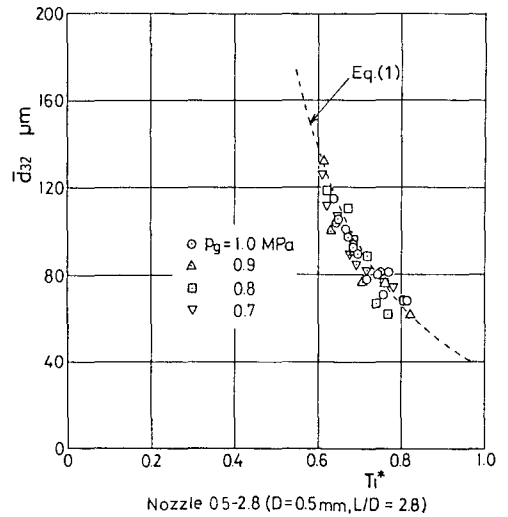


図5 平均粒径（液柱分裂形微粒化）

第3章 加圧過熱液体噴流の微粒化特性

噴霧の平均粒径，粒度分布，噴霧角，噴霧分散量分布等の主要な微粒化特性を測定し，液体の分裂機構との関連を考察した。

まず平均粒径の測定結果について述べる。黄銅製ノズルを用いて，水の過熱度及び噴射圧力に対応して変化する噴霧の平均粒径を無次元過熱度 T_L^* で整理した結果を図5，6に示す。液柱分裂形微粒化では高過熱度において本格的な微粒化を開始し， $T_L^* > 0.55$ になると急激に平均粒径が減少する。一方，気液二相噴出形の噴霧生成においては液柱分裂形に比べて一般に平均粒径が小さく，ノズル内部での気泡生成の相違によって平均粒径が $T_L^* \div 0.55$ を境に2つの異なる減少傾向を示す。

両微粒化形態とも，噴射圧力とは無関係に T_L^* に対し平均粒径が指数関数的に減少することから， T_L^* とノズル寸法をもとに平均粒径の実験式を導くと以下ようになる。

液柱分裂形微粒化

($L/D < 7$, $D = 0.5 \text{ mm}$, $0.55 \leq T_L^* < 1$) では

$$\bar{d}_{32} = 36.8 (T_L^*)^{-2.58} \quad \mu\text{m} \quad (1)$$

気液二相噴出形微粒化

($L/D > 7$, $D = 0.5 \sim 1.3 \text{ mm}$) では

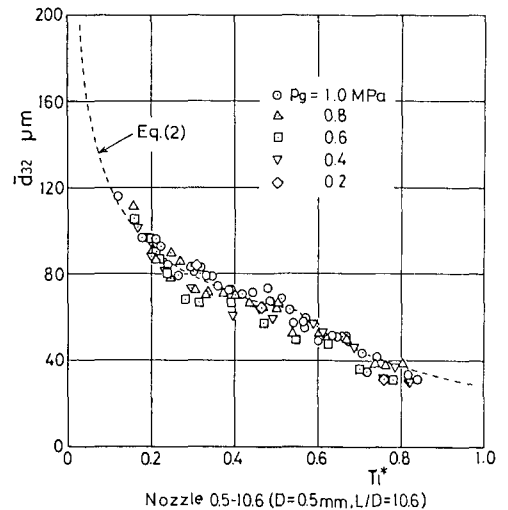


図6 平均粒径（気液二相噴出形微粒化）

$0 < T_L^* \leq 0.55$ に対し

$$\bar{d}_{32} = 70.4 \{-1 + 0.14 (L/D)\}^{-0.22} D^{0.72} (T_L^*)^{-0.38} \quad \mu\text{m}$$

$0.55 \leq T_L^* < 1$ に対し

$$\bar{d}_{32} = 39.1 \{-1 + 0.14 (L/D)\}^{-0.22} D^{0.72} (T_L^*)^{-1.33} \quad \mu\text{m}$$

(2)

続いて行われた噴霧角及び噴霧分散量分布の測定結果から、液柱分裂形微粒化では、高過熱度において、広噴霧角で半径方向へも分散流量の大きい末広がりな噴霧流が得られることを知り得た。2つの微粒化形態に対する、分散流量分布の液温に対する変化を図7に比較して示す。

第4章 微粒化特性の改善

過熱液流に激しい乱れを与える及び気泡核を供給するという方針のもとに、以下に示す5通りの方法で沸騰促進による微粒化特性の改善を試み、前章までの単孔ノズルを用いた基礎実験の結果との比較検討を行った。

- (1) 単孔ノズルから噴出する過熱液体噴流をターゲットに衝突させる。
- (2) 単孔ノズル出口にワイヤメッシュを設ける。
- (3) ノズル内壁面をねじ加工し、核沸騰を促進させる。
- (4) ノズル入口上流部にワイヤメッシュを設ける。
- (5) ノズル入口上流部にしぼり用のノズルを設ける。

その結果、過熱液体に強い乱れを与えると液中の無数の気泡核がいきなり活性化し著しく微粒化が良好になること、またノズル内で沸騰を促進する場合にはきめ細かく均質な気泡流状態にすることで安定な噴霧流を生成できることなどが判明した。

第5章 水混入式による高粘度液体の微粒化

実用の重質油燃料は沸点が高く、加熱による分解も伴うため、直接高温まで加熱して沸騰させることは得策とは言い難い。そこで沸点の低い水を燃料油中へ混合させ、水の沸騰によって周囲の燃料液をはじきとばすという方法が考えられる。

ここでは、図8に示す方法でノズル部へ導かれた高沸点高粘度油(高粘度燃料を模擬した流動パラフィン)中へ別個に加圧加熱した高温水を注入混合させ、過熱水滴の突沸現象を乳化燃料の微粒化

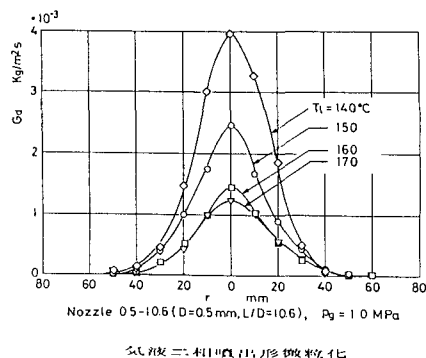
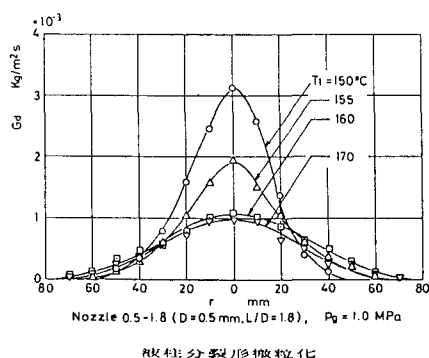


図7 噴霧の分散量分布

へ積極利用する方法を提案する。この方法には攪拌混合操作や乳化促進剤が不要であり、また加熱によって2液相に分離してしまうという不都合もない。

図9は、ノズル内における2液の乳化と水の沸騰による噴霧生成の様相を示したものである。

2液の噴射圧力差と水の過熱度を広範に変えた実験から、2液を良く乳化した活発な沸騰微粒化による噴霧生成を行わせるためには、次に示す2つの噴射条件を満足すればよいことが明らかにされた。すなわち

2液が良好に混合乳化する条件：

$$\left(\frac{\nu_w}{\nu_P}\right)\left(\frac{\rho_P D_w u_w^2}{\sigma_I}\right) > 0.26 \quad (3)$$

分散した水滴が活発に突沸を起こす条件：

$$\left(\frac{\nu_w}{\nu_P}\right)\left(\frac{\rho_P D_w u_w^2}{\sigma_I}\right)\left\{T_L^*\left(\frac{Q_w}{Q_{tot}}\right)\right\}^{1.12} > 0.017 \quad (4)$$

$(\nu_w/\nu_P)(\rho_P D_w u_w^2/\sigma_I)$ はノズル内の2液の混合状況を、また $T_L^*(Q_w/Q_{tot})$ は沸騰微粒化をあらわす無次元パラメータである。

噴霧の平均粒径も、上記2つの無次元パラメータを用いて次の実験式により整理された。

$$\bar{d}_{32} = 173 \left\{ \left(\frac{\nu_w}{\nu_P}\right)\left(\frac{\rho_P D_w u_w^2}{\sigma_I}\right) \right\}^{-0.22} \left\{ T_L^* \left(\frac{Q_w}{Q_{tot}}\right) \right\}^{0.38} \quad \mu m \quad (5)$$

以上の評価は、多くの実用燃料へ応用する場合でも、分解等の燃料自体の変質が著しくない限り適用可能であると考えられる。

第6章 結 論

加圧過熱液体噴流の微粒化について、広範な実験条件のもとに微粒化現象の観察と微粒化特性の測定が行われ、ほぼこれらの輪郭が明らかにされた。

得られた結果の多くは、無次元数による一般表示や実験式の形で整理がなされており、実用噴射弁の設計や操作条件の資料として有用であると考えられる。

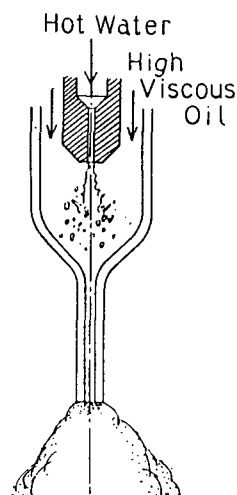


図8 水混入法

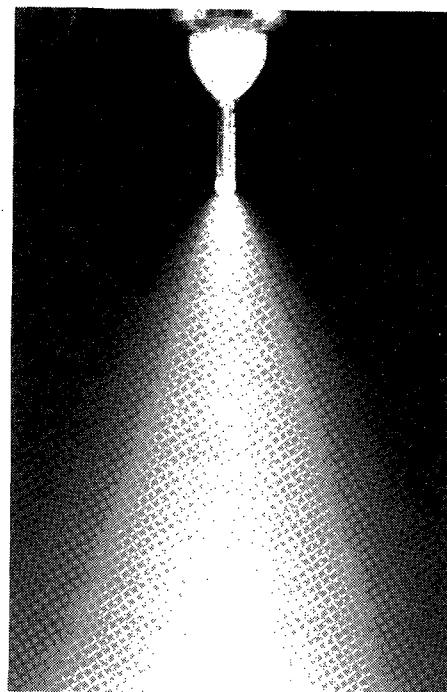


図9 2液の乳化と水の沸騰による噴霧生成

審査結果の要旨

加圧高温液体をノズルから噴射して、液体温度の飽和蒸気圧以下まで急減圧すると、過熱状態となった液体は瞬時に沸騰、分裂して微粒化される。このような過熱噴流の分裂現象については最近多くの研究が行われて、気泡の生成と成長過程や分裂機構などが解明されつつあるが、新しい液体微粒化法としてこの現象を利用するには、噴流挙動の伝熱工学的な解明と併せて現象に関与する諸因子の影響を包含する総合的な微粒化特性を提示することが必要である。

本論文は、このような観点から、単孔ノズルを用いて過熱噴流の微粒化機構、特性およびその改善法について一連の実験的研究を行った成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、過熱噴流内の気泡成長速度の測定結果から成長機構を考察し、三つの基本的な気泡生成要因を明示するとともに、微粒化形態を液柱分裂形と気液二相噴出形に大別してそれぞれの特徴を説明し、さらに各気泡生成要因に基づいた微粒化領域をノズル寸法、レイノルズ数および本研究で定義した無次元過熱度を用いて分類している。

第3章では微粒化特性に及ぼす諸因子の影響を詳細に調べた結果について述べている。すなわち、気泡生成要因の相違によって過熱度に対する噴霧粒径の変化の傾向が異なることを示して、平均粒径を求める実験式を提唱するとともに、単孔ノズルによる微粒化では噴霧角の大きい中実噴霧流が容易に形成され、過熱度が大きいほど粒度分布の均一性が向上するなどの重要な知見を得ている。

第4章では、過熱噴流に乱れを付加して気泡生成を促進させる手段として、機構の異なる数種の方法を考案し、低過熱度でも良好な微粒化が行われることを立証して特性改善の方向を示唆している。

第5章では、高沸点高粘度液体の有効な微粒化方法として、不溶性低沸点液体の混入による減圧沸騰微粒化を発想し、流動パラフィンへの水混入についてノズル構成と噴射条件を検討し、微粒化特性を調べている。流動パラフィンは水の沸騰によって微粒化して乳化状態の噴霧粒となり、噴霧の平均粒径は過熱度、流量比、粘度比およびウェーバ数の関数として求められることを示して、高粘度重質油の微粒化に資するデータをj得ている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、加圧過熱液体噴流の基本的な微粒化機構と特性を提示するとともに、実用設計に資する多くの知見と基礎資料を提供したものであり、噴霧工学ならびに精密工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。